E/CONF.39/A/68
3 Oct.1962
ORIGINAL : FRANCAIS

CONFÉRENCE DES NATIONS UNIES
SUR L'APPLICATION DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNIQUE
DANS L'INTÉRÊT DES RÉGIONS PEU DÉVELOPPÉES

Point de l'ordre du jour : A.4.3.1

France

PRODUCTION D'ENERGIE AU MOYEN DE GENERATEURS DE GAZ A PISTONS LIBRES

Par P. CHAMBADAL,
Chef du Service des Recherches Thermiques,
Direction des Etudes et Recherches,
Electricité de France

et M. GARLET,
Chef de la Division Thermique,
Inspection Général
pour la Coopération Hors Métropole,
Electricité de France

Les mémoires rédigés à l'intention de la Conférence des Nations Unies sur l'application de la science et de la technique dans l'intérêt des régions peu développées sont des documents de travail. Ils sont publiés tels qu'ils ont été présentés et les assertions et opinions qu'ils contiennent sont celles de leurs auteurs.

NOTES

1. Les mémoires choisis pour être présentés en séance générale pourront être obtenus à la Conférence dans les langues officielles suivantes des Nations Unies: anglais, espagnol, français et russe.

2. Les mémoires choisis pour être présentés en séance spéciale pourront être obtenus à la Conférence dans l'une seulement de ces langues officielles.

3. Les résumés qui ont été rédigés pour tous les mémoires par les auteurs de ceux-ci pourront être obtenus à la Conférence dans les langues officielles suivantes des Nations Unies: anglais, espagnol, français et russe.

4. Préalablement à la Conférence, les mémoires et les résumés ne feront pas l'objet d'une distribution générale mais d'un tirage restreint destiné aux délégations des gouvernements et autres participants officiels. La publication et la distribution générale des actes de la Conférence s'effectueront conformément aux règles et pratiques agréées par le Comité des publications des Nations Unies.

PRODUCTION D'ENERGIE AU MOYEN DE GENERATEURS DE GAZ A PISTONS LIBRES

par

P. CHAMBADAL, Chef du Service des Recherches Thermiques, Direction des Etudes et Recherches, Electricité de France

et M. GARLET, Chef de la Division Thermique, Inspection Générale pour la Coopération Hors Métropole, Electricité de France.

1. - Principe des générateurs à pistons libres

Parmi les moyens de production d'énergie mécanique ou électrique, les turbines à gaz alimentées par des générateurs pistons libres occupent une place de plus en plus importante. Certains avantages des installations de ce genre sont particulièrement appréciables pour les régions peu développées, ce qui explique qu'un grand nombre de telles installations soient dès à présent en service dans ces régions.

Le générateur à pistons libres joue, à l'égard de la turbine à gaz, un rôle analogue à celui qu'une chaudière joue à l'égard d'une turbine à vapeur : il lui fournit le fluide à pression et température élevées dont la détente dans la turbine développe la puissance mécanique désirée. La différence essentielle entre une telle turbine à gaz et une turbine à gaz du type classique consiste donc dans le fait que cette dernière entraîne elle-même le compresseur produisant l'élévation de pression nécessaire pour permettre la détente du fluide, tandis que la première ne prend aucune part à cette compression.

La figure 1 représente la coupe schématique du générateur de gaz de construction S.I.G.M.A. L'appareil est constitué par un cylindre à axe horizontal A dans lequel se trouvent deux équipages mobiles identiques et symétriques dont chacun comporte deux pistons de diamètre différent. Le combustible est injecté par l'injecteur 7 lorsque les deux équipages mobiles se trouvent au voisinage du point mort intérieur ; il s'enflamme sous l'effet de l'échauffement subi par l'air au cours de sa compression préalable : la machine fonctionne donc comme un moteur Diesel à deux temps. La pression entre les deux pistons i augmente rapidement, et les équipages mobiles sont projetés vers l'extérieur. Pendant ce

déplacement des équipages mobiles, il se produit, dans les capacités 4, une dépression, ce qui provoque l'ouverture des clapets d'aspiration 5 ; en même temps, l'air se trouvant dans les capacités 3 (ou matelas) est comprimé, et c'est la détente ultérieure de cet air qui repousse les équipages mobiles vers le centre. Les clapets 5 se ferment, et lorsque la pression dans les capacités 4 a atteint une certaine valeur, ce sont les clapets de refoulement 6 qui s'ouvrent ; l'air comprimé pénètre alors, à travers les lumières de balayage, dans la chambre de combustion et chasse les produits de combustion qui pénètrent dans un réservoir-tampon B. Un certain débit d'air pur vient se mélanger avec ces gaz de combustion, et c'est ce mélange qui se détend finalement dans la turbine C. Sous l'effet du déplacement des pistons vers le centre, les lumières de balayage (à gauche, dans la figure 1) et celles d'échappement (à droite) se ferment, et il reste entre les deux pistons 1 une certaine masse d'air pur dont la compression produit l'échauffement nécessaire à l'allumage de la nouvelle charge de combustible injectée dans le cylindre moteur 2.

2. - Intérêt de l'emploi des générateurs

L'emploi des générateurs de gaz à pistons libres présente plusieurs avantages qui sont énumérés ci-dessous.

a) La compression de l'air ayant lieu dans le générateur, la turbine n'a pas à entraîner un compresseur ; par conséquent, la turbine ne doit produire que la puissance utile qui lui est demandée, et non une puissance trois fois plus élevée, comme c'est le cas pour les turbines à gaz ordinaires.

b) La température à l'entrée de la turbine n'est que de l'ordre de 450°C (au lieu de 700 à 800°C pour une turbine à gaz ordinaire), ce qui permet d'utiliser pour la construction des métaux d'un prix modéré.

c) Malgré cette faible valeur de la température d'admission, le rendement global de l'installation est élevé (il est d'environ 35 %) car ce rendement est déterminé par la température atteinte dans la chambre de combustion du générateur, qui est supérieure à 1 500°C.

d) Ce rendement élevé peut être obtenu même dans des installations de faible puissance. En effet, le générateur S.I.G.M.A. est construit d'après un seul modèle fournissant une puissance unitaire de 750 kW, et c'est en alimentant la turbine par plusieurs générateurs fonctionnant en parallèle qu'on obtient des puissances plus élevées. D'autre part, les conditions de fonctionnement de la turbine permettent d'assurer à celle-ci un rendement élevé même pour une puissance de l'ordre de 750 kW ; cette double circonstance conduit, pour les installations de ce type, à des rendements qui ne varient que dans une faible mesure avec la puissance nominale.

e) L'expérience a montré que les générateurs à pistons libres peuvent fonctionner avec des fuels lourds, sans que ceux-ci doivent être soumis à un traitement autre qu'un réchauffage et une centrifugation. A l'avantage d'une faible consommation spécifique vient donc s'ajouter celui d'un bas prix du combustible ; les dépenses de combustible par kilowatt-heure sont donc peu élevées, ce qui rend possible l'emploi des générateurs pour la production d'énergie électrique de base.

f) Le démarrage des générateurs, qui est effectué à l'aide d'air comprimé, est une opération très rapide, ce qui rend ces machines

aptes à assurer aussi la fourniture d'énergie de pointe ou de secours.

g) Enfin, les générateurs alimentant en parallèle la même turbine sont mécaniquement indépendants les uns des autres ; il en résulte que l'arrêt d'un générateur ne provoque qu'une réduction de puissance, et non un arrêt complet de l'installation.

3. - Construction d'un générateur

La figure 2 montre la coupe longitudinale d'un générateur S.I.G.M.A. GS-34. Les diamètres des pistons composant chacun des deux équipages mobiles sont de 34 et de 90 cm. Les pistons de 34 cm (pistons moteurs) se déplacent dans un cylindre moteur 4 comprenant deux chemises en fonte et un anneau central en acier ; ces chemises sont munies de lumières (de balayage et d'échappement) dont l'ouverture et la fermeture sont produites directement par les déplacements des pistons. De même, les pistons de 90 cm se déplacent dans des cylindres compresseurs 2 qui sont munis de clapets d'aspiration automatiques 6 ; ces cylindres sont fermés, du côté intérieur, par une plaque portant les clapets automatiques de refoulement 7, et du côté extérieur, par une culasse 3. L'ensemble des cylindres est suporté par un carter de construction soudée 1, carter qui joue aussi le rôle d'un réservoir d'air de balayage.

Afin d'assurer la symétrie parfaite des déplacements des équipages mobiles, on relie ceux-ci par un embiellage de synchronisation qui doit simplement compenser les inégalités de frottement accidentelles et qui, par conséquent, peut être très léger. Les pistons moteurs sont refroidis par une circulation d'huile 9 et 10 ; d'autres organes sont refroidis par une circulation d'eau. La figure montre aussi que les pistons compresseurs sont reliés entre eux par un tube 8 qui assure la communication entre les matelas. Le démarrage de la machine est obtenu en plaçant les deux équipages mobiles près du point mort extérieur et en envoyant dans les matelas de l'air comprimé fourni par un réservoir.

4. - Structure d'une unité de production équipée de générateurs à pistons libres

Une unité de production équipée de générateurs à pistons libres comprend essentiellement :

- un ensemble de générateurs produisant des gaz chauds sous pression et débitant en parallèle sur un collecteur commun de gaz,

- une turbine de détente alimentée par ce collecteur et entraînant un alternateur.

Lorsqu'elle constitue une tranche d'une centrale, cette unité est généralement complétée par un transformateur-élévateur de puissance qui lui est propre.

L'aspiration de chaque générateur est munie d'un filtre et d'un dispositif antibruit. Ce dernier, rendu nécessaire par l'émission d'ondes acoustiques de basse fréquence (7 à 10 Hz) accompagnant les battements des pistons des générateurs et qui pourraient gêner le voisinage, est constitué par une capacité ou plusieurs capacités en série formant résonateurs et reliées par des venturis. On met à profit

l'existence de ce dispositif pour suralimenter les générateurs par effet acoustique (tuning).

Le trajet des gaz chauds, depuis l'entrée dans le collecteur jusqu'au rejet à l'atmosphère par une cheminée généralement métallique, se fait à pleine ouverture sans intervention d'aucune soupape de réglage. C'est en effet le cran de combustible de chaque générateur que commande directement le régulateur de la turbine (ou le variateur), au moyen d'un circuit à huile modulée commun à tous les générateurs.

Toutefois, les générateurs ne peuvent fonctionner de façon stable en dessous d'un certain débit unitaire de gaz. Aussi, aux basses charges, le circuit de régulation cesse-t-il d'agir sur le cran de combustible pour provoquer l'ouverture progressive d'une soupape de décharge placée à l'échappement de chaque générateur et aboutissant à une cheminée individuelle munie d'un silencieux.

Les mêmes soupapes de décharge contribuent à limiter l'emballement de la turbine en cas de déclenchement électrique.

L'alimentation des générateurs en fuel résiduel (genre fuel lourd n° 2 ou bunker C), qui est le combustible de marche normale dès que le facteur d'utilisation de l'unité de production en cause devient notable, se fait généralement à partir d'une cuve-relais de quelques mètres cubes. Le fuel résiduel, préalablement réchauffé et épuré par centrifugation, contenu dans la cuve-relais, y est aspiré par une pompe volumétrique pour être porté à la température assurant une bonne pulvérisation dans les cylindres moteurs, et distribué par une rampe aux différents générateurs.

Le circuit d'alimentation en fuel résiduel est doublé par un circuit distinct d'alimentation en combustible distillé (genre gas-oil, diesel-oil ou fuel domestique) à partir d'une autre cuve-relais le plus souvent commune à plusieurs unités. Le combustible distillé doit en effet être utilisé au démarrage ainsi qu'avant l'arrêt de l'unité.

Le refroidissement des générateurs est assuré par :

- un circuit fermé d'eau douce intéressant les cylindres moteurs et les plaques porte-clapets,

- un circuit d'huile intéressant principalement les pistons.

L'eau et l'huile de ces deux circuits sont elles-mêmes refroidies dans des échangeurs en relation avec un circuit primaire ouvert d'eau brute, en place duquel des ressources naturelles limitées peuvent d'ailleurs imposer un circuit fermé avec aéroréfrigérants.

Le turboalternateur est pourvu des mêmes accessoires et auxiliaires de graissage et refroidissement qu'une unité thermique classique :

- circuits d'huile combinés basse pression (graissage et refroidissement) et haute pression (sécurité, commande et régulation) actionnés par une pompe mécanique attelée au rotor de la machine, elle-même supléée par des pompes électriques en secours ainsi que lors des démarrages, arrêts et virages, et refroidis par un échangeur en relation avec le circuit primaire mentionné ci-dessus,

- l'alternateur étant généralement fermé, circuit d'eau de refroidissement de l'air de l'alternateur formé par une dérivation du même circuit primaire.

Le débit nécessaire d'eau brute de refroidissement en circuit ouvert est au total de l'ordre de 300 m3/h pour une unité de 6 MW, donc intermédiaire entre ce qu'il faudrait pour la même unité à turbine à gaz classique (50 à 100 m3/h) et à vapeur à condensation (1 500 à 2 000 m3/h).

5. - Considérations intervenant dans la conception générale d'une centrale

Les considérations qui suivent s'inspirent principalement, dans le sens souhaité à la présente Conférence, de résultats d'études d'équipement faites récemment à Electricité de France pour le compte de diverses Sociétés de production et distribution d'énergie électrique d'Outre-mer. Il importe de préciser qu'il s'est agi de façon générale d'unités de quelques MW dans des pays tropicaux brûlant uniquement des combustibles liquides importés, ensemble de circonstances qui ouvrent assez largement la compétition technique et économique entre les 4 sortes d'équipements thermiques possibles : diesel, vapeur, turbine à gaz à compresseur rotatif, turbine à gaz alimentée par générateurs à pistons libres, et que l'on devra garder présentes à l'esprit pour donner leur pleine valeur aux considérations qui suivent, excluant toutes hypothèses particulières pouvant rendre le choix évident telle que : au profit de la vapeur, utilisation de charbon comme combustible, puissance unitaire élevée - au profit du diesel, faible puissance unitaire - au profit de la turbine à gaz à compresseur rotatif, absence d'eau ou utilisation de gaz naturel à très bas prix;

La valeur tant technique qu'économique de chacune des 4 solutions ainsi envisagées doit évidemment être appréciée selon le service demandé à la centrale projetée. Or l'on peut, au moins théoriquement et de façon très schématique, assimiler ce dernier à l'un des deux ordres suivants :

1) service de secours, d'appoint ou de pointe, impliquant surtout : un coût modique de premier établissement, un démarrage sûr et rapide, des soins pratiquement nuls en dehors des périodes de fonctionnement,

2) service de base, où l'utilisation du matériel est à la fois plus poussée et mieux prévisible, et dans le cas duquel l'on doit au contraire s'attacher de façon essentielle aux dépenses de combustible et à la disponibilité.

Sans doute, la distinction précédente est-elle significative dans un pays industrialisé où un nombre important de centrales alimentent un réseau interconnecté et dont le développement énergétique se poursuit de façon mesurée. Mais elle peut devenir très artificielle dans un pays peu développé, où l'on a souvent affaire à des réseaux séparés alimentés chacun par une ou quelques centrales et dont la demande s'accroit de façon rapide et assez irrégulière. Or il apparaît que la formule pistons libres offre à un haut degré le caractère d'élasticité technique et économique que ces conditions feront particulièrement rechercher : fournissant la meilleure solution dans un domaine d'utilisation déjà étendu, elle correspondra encore au-delà à une opération très acceptable.

Comparé à l'équipement vapeur, volontiers retenu pour un service intensif en raison de son économie de marche et de son endurance, souvent aussi de l'habitude qu'en ont les exploitants, il offre un rendement thermique plus élevé tout en acceptant un combustible aussi ordinaire moyennant sa centrifugation préalable, et une disponibilité aussi bonne, meilleure dans le cas d'une centrale à une seule unité.

Comparé à l'équipement turbine à gaz classique à cycle ouvert et combustible distillé -solution type pour une utilisation réduite- il peut être démarré aussi rapidement en cas de besoin, un détimbrage moindre en atmosphère tropicale réduit à peu de choses son supplément d'investissements. Un dépassement de l'utilisation prévue n'a pas les mêmes effets sur les dépenses d'exploitation, grâce à un rendement nettement meilleur, surtout à faible charge, et à une possible conversion ultérieure à l'emploi d'un combustible bon marché.

Comparé à un équipement diesel, son rendement n'est pas très inférieur compte tenu des consommations respectives d'huile de graissage. L'entretien est plus facile et, au moins dans le cas d'une unité isolée, la disponibilité mieux assurée. Le diesel semi-rapide ne couvre que le début de la gamme de puissances, son fonctionnement au fuel lourd ne semble pas acquis avec un entretien acceptable. Le diesel lent type marine est plus cher d'établissement.

Le bloc usine d'une centrale à pistons libres n'est pas sans analogie de structure avec celui d'une centrale à vapeur, devant donner place d'une part à des turbo-alternateurs comme dans une salle des machines classique, d'autre part à des générateurs comme dans une chaufferie. Mais l'analogie reste assez superficielle. En effet, si l'alternateur (horizontal à 3 000 tr/mn) est le même, la turbine offre le maximum de simplicité et le minimum d'encombrement d'une turbine à gaz de détente, dépourvue de condenseur et de poste d'eau (aussi bien que de compresseur et de chambre de combustion). D'un autre côté, par opposition à une chaufferie nécessairement développée en hauteur, les générateurs se placent naturellement au niveau d'un plancher général de service et forment un ensemble moins complexe.

Ces circonstances, jointes à l'indépendance des générateurs et aux libertés de tracé du collecteur les reliant entre eux et à la turbine, confèrent à la centrale à pistons libres une souplesse de structure facilitant son adaptation aux conditions particulières rencontrées. Relativement courts, les turbo-alternateurs se prêtent à une disposition en alignement longitudinal dans un hall dès lors plus étroit d'où économies dans le pont roulant et le génie civil. Par ailleurs, les générateurs ne comportent aucune pièce lourde, demandent peu de hauteur libre et des moyens de manutention réduits (monorails). Au total les dépenses d'infrastructure et bâtiment d'une centrale à pistons libres sont sensiblement inférieurs à ceux d'une centrale vapeur ou diesel lent de même puissance, et restent assez comparables à ceux d'une centrale à turbine à gaz, du moins tant que l'on exclut la possibilité d'une installation out-door : la surface bâtie est plus étendue, mais les portées et hauteurs plus faibles pour une part.

6. - Exemples de réalisations

Nous nous intéresserons presque exclusivement aux unités constituées au moyen de générateurs simples GS 34 timbrés à 1 250 ch, qui équipent de nombreuses centrales en exploitation dans le monde. En effet leur épreuve industrielle s'en trouve désormais suffisante pour que, recherchant en vue d'un nouvel équipement en pays peu développé la meilleure parmi plusieurs solutions possibles, l'on n'hésite pas à inclure dans ces dernières la solution pistons libres à égalité de chances à priori avec ses compétitrices habituelles : vapeur, diesel, turbine à gaz.

6.1 - Unités de 6 MW

La première réalisation a été celle de Cherbourg-Equeurdreville (1 unité) en France, qui a démarré en 1956 et a fortement contribué à la mise au point industrielle des générateurs GS 34.

Actuellement, 2 unités de 6 MW viennent d'être installées à Abidjan en Côte-d'Ivoire, en première étape de la nouvelle centrale thermique.

Chaque unité a été comprise comme une tranche distincte, mais, pouvant être appelée à une marche poussée, a été équipée de 9 générateurs GS 34 au lieu des 8 suffisant à assurer de façon continue la puissance nominale de 6 MW aux bornes de l'alternateur. Cela permet à un moment quelconque d'avoir un générateur en entretien et d'assimiler la disponibilité de chaque unité à celle de son ensemble turboalternateur-collecteur de gaz.

Générateurs et turboalternateurs ont été installés dans des bâtiments distincts quoique bien entendu juxtaposés en un même bloc usine, chacun de ces bâtiments s'adaptant mieux séparément à deux sortes de matériel qui ont des servitudes tout de même assez différentes, une raison supplémentaire résidant dans l'ambiance sonore plus élevée des générateurs. Le bloc usine est complété par un bâtiment des services généraux contigu aux 2 bâtiments précédents et où prennent place principalement le poste de réchauffage et épuration du combustible, la salle des tableaux de distribution, la salle de conduite.

6.2 - Unités de 1,5 MW

Ces unités sont équipées de 2 générateurs alimentant un turbo réducteur. Citons la centrale E.D.F. d'Ajaccio, en Corse, qui comporte 3 de ces unités.

Retenons de divers schémas de centrales à deux unités, la souplesse de l'association générateurs-turbines, mise à profit pour retrouver malgré le petit nombre de générateurs une sécurité de marche analogue à celle de l'unité de 6 MW : cinquième générateur en supplément pouvant alimenter l'une ou l'autre turbine, ou collecteur de gaz entièrement commun aux 2 unités.

6.3 - Unités de grande puissance

A l'autre extrémité de l'échelle des puissances, nous ne saurions omettre la centrale E.D.F. actuellement en construction en France, à Chartres. Centrale de développement d'une technique plus avancée, elle est équipée de 12 générateurs jumelés GS 2 34 alimentant

un turboalternateur dont la puissance nominale aux bornes doit atteindre d'abord 20 MW pour être poussée ensuite à 26 MW. La technique pistons libres est donc appelée à concurrencer la technique vapeur dans un domaine de puissances unitaires interdit au diesel et intéressant particulièrement les pays peu développés.

7. - Production combinée de chaleur et d'énergie électrique au moyen de générateurs à pistons libres

La production simultanée d énergie électrique et de chaleur est habituellement assurée par une turbine à vapeur, soit du type à contre-pression, soit du type à prélèvement et condensation. Dans le premier cas, la puissance électrique fournie par le groupe varie avec le débit de vapeur nécessaire au chauffage, tandis qu'en fait, les besoins de puissance et de chaleur peuvent varier indépendamment l'un de l'autre ; dans le second, une partie de l'énergie électrique nécessaire est fournie par de la vapeur détendue jusqu'à la pression du condenseur, ce qui correspond à une consommation spécifique élevée, c'est-à-dire à un rendement médiocre.

On peut obtenir à la fois un rendement plus élevé et une plus grande souplesse de fonctionnement en combinant la chaudière à vapeur avec un moteur à combustion interne, par exemple, avec une turbine à gaz alimentée par des générateurs à pistons libres. Lorsqu'une telle turbine à gaz n'est pas associée à une chaudière les pertes par chaleur sensible des gaz à l'échappement représentent environ 41 % de la chaleur fournie par la combustion ; la combinaison de cette turbine avec une chaudière permet d'abaisser ces pertes à 7 % environ, ce qui correspond évidemment à un accroissement notable du rendement global.

Une telle combinaison peut être réalisée de plusieurs manières différentes. Ainsi, la chaudière, placée à l'aval de la turbine à gaz, peut être du type "à récupération", la vapeur étant produite aux dépens de la chaleur sensible des gaz sortant de la turbine. Il est également possible de munir la chaudière d'un foyer, en utilisant pour la combustion l'oxygène restant dans les gaz passant de la turbine[X]. De plus, la vapeur produite dans la chaudière peut être détendue dans une turbine à contre-pression, avant d'être envoyée dans les appareils de chauffage. L'étude du problème montre que, dans une installation combinée, on a intérêt à augmenter la puissance électrique produite pour un débit donné de vapeur de chauffage, donc aussi pour un débit donné d'air aspiré ; or, les générateurs à pistons libres permettent de remplir cette condition d'une manière particulièrement satisfaisante.

La production de vapeur de chauffage n'est pas le seul moyen de récupération de la chaleur disponible dans les gaz d'échappement de la turbine. Cette chaleur peut trouver aussi d'autres utilisations, comme, par exemple, la distillation d'eau de mer ou la production de froid par absorption. Toutes ces possibilités augmentent encore l'intérêt que présente la production d'énergie au moyen de générateurs de gaz à pistons libres.

X - dans la chaudière.

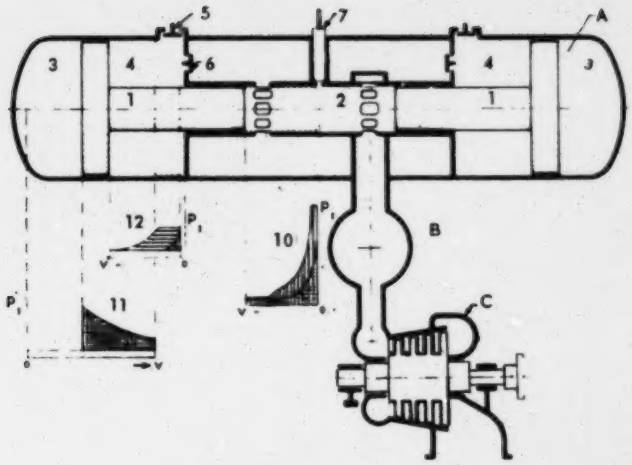

Figure 1

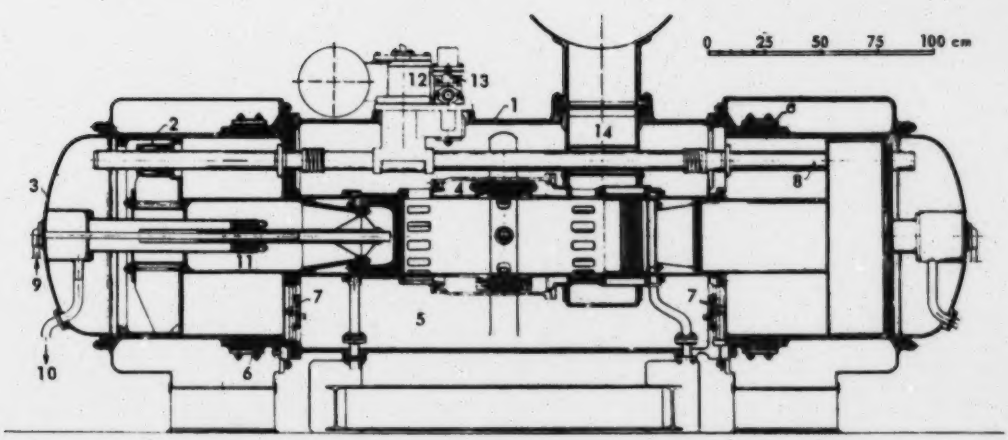

Figure 2

422 F - Oct.1962 - 1,000